

ANALIZA TEMPERATURNEGA POLJA NA DELOVNI POVRŠINI ORODJA ZA TLAČNO LITJE Z UPORABO TERMOGRAFIJE

TEMPERATURE-FIELD ANALYSIS ON THE WORKING SURFACE OF A DIE-CASTING DIE USING THERMOGRAPHY

**Borut Kosec¹, Bojan Težak², Ladislav Kosec¹, Janez Kopač³,
Jelena Vojvodič Tuma⁴**

¹Univerza v Ljubljani, NTF - Oddelek za materiale in metalurgijo, Aškerčeva 12, 1001 Ljubljana, Slovenija

²TERMING, d.o.o., Vodnikova 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

³Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1001 Ljubljana, Slovenija

⁴IMT, Lepi pot 11, 1001 Ljubljana, Slovenija
kosec@tt72.ntfmim.uni-lj.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-05; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-06

Na delovni površini orodja za tlačno litje ulitkov iz aluminijeve zlitine AlSi9Cu3 so po manj kot 1000 ulitkih nastale razpoke, katerih odtisi se poznajo tudi na ulitkih. Razpoke na površini orodja so vidne z lupo, nekatere pa celo s prostim očesom. Poleg konstrukcije in izbire materiala orodja ter procesa temperaturnega utrujanja, ki je posledica pogojev dela, prispeva k nastanku razpok na površini orodja tudi nehomogena in prenizka začetna temperatura aktivne delovne površine orodja. Višino in homogenost temperaturnega polja na aktivni delovni površini zadnjega kalupa orodja smo med predgrevanjem kontrolirali z uporabo termografije.

Glavne besede: orodje za tlačno litje, delovna površina, aluminijeve zlitine, temperaturno polje, homogenost, termografija

On the working surface of a casting die cracks appeared after less than 1000 shots and caused imprints on AlSi9Cu3 alloy castings. The cracks on the surface are visible with magnifying glass observation.

Material selection, die design and thermal stress fatigue due to the working conditions, as well as the inhomogeneous and low initial die temperature contribute to the crack formation.

The intensity and homogeneity of the temperature field on the working surface of the fixed-die half during the preheating process were checked using thermographic analysis.

Keywords: die-casting die, working surface, aluminium alloy, temperature field, homogeneity, thermography

1 UVOD

Orodja za tlačno litje kovin je treba pred delom segreti na ustrezno temperaturo, ki jo vzdržujemo tudi med odmori. Sodobna orodja segrevajo s tekočino (oljem), ki teče po sistemu kanalov v orodju in hladi orodja med delom.

Pri orodjih, hlajenih s tekočino (vodo oz. oljem), so pogostokrat zanemarili pomembnost predgrevanja; orodja sploh niso predgreta vnaprej, ampak se to naredi z določenim številom poskusnih ulitkov. Zato so začetne temperature pogosto prenizke ali neenakomerne. Nespoštovanje tega pravila je vzrok za poškodbe orodij zaradi toplotnih šokov (termošokov) pa tudi pospešenega temperaturnega utrujanja.

V prispevku opisujemo primer kontrole enakomernosti temperature na aktivni delovni površini zadnjega kalupa orodja za tlačno litje ulitkov iz aluminijeve zlitine. Orodje je bilo ogreto na začetno temperaturo 240 °C. Za merjenje temperaturnih razlik na aktivni delovni površini orodja smo uporabili termografsko kamero.

2 POŠKODBE NA ORODJU

Na delovni površini orodja (**slika 1**) za tlačno litje ulitkov iz aluminijeve zlitine AlSi9Cu3 so po manj kot



Slika 1: Zadnji kalup orodja za tlačno litje
Figure 1: Fixed half of die-casting die

1000 ulitkih v prehodih med dvema ravninama stene kalupa nastale razpoke, katerih odtisi se poznajo tudi na ulitkih. Razpoke na površini orodja so dobro vidne z lupo, nekatere pa že celo s prostim očesom.

Poškodbe orodij za tlačno litje aluminijevih zlitin imajo najbolj pogosto obliko velikih razpok, toplotnega razpokanja, razpokanja v ogljiščih, ostrih prehodih ali robovih in zaradi obrabe ali erozije^{1,2}. Za prve tri primere poškodb so odločilne napetosti, katerih izvori so v načrtovanju, v izdelovalnih tehnologijah in v delovnih razmerah. Od naštetih štirih najbolj pogostih vrst lahko poškodbe, na delovni površini orodja (**slika 2**), prištevamo k začetku toplotnega razpokanja in razpokanju v ogljiščih, robovih in prehodih³. Nastanek razpok na orodjih za tlačno litje je praviloma posledica več istočasnih vplivov^{4,5}, zato je treba poleg predložene možnosti analizirati tudi druge možne vzroke.

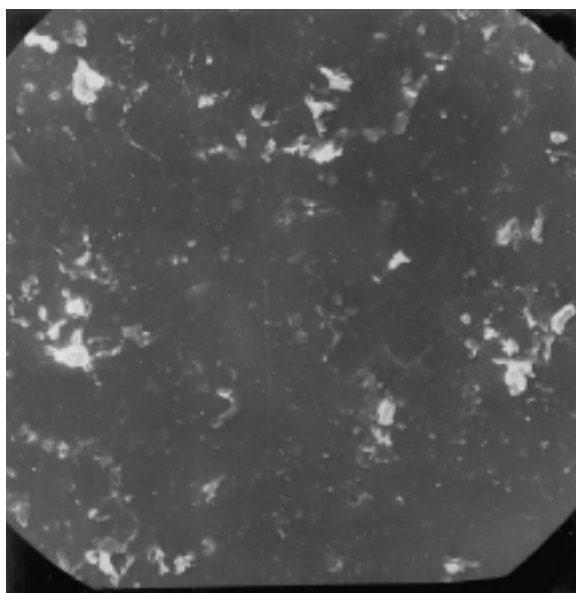
3 MATERIAL ORODJA

Orodje je bilo izdelano iz jekla BOEHLER W300 ISODISC⁶⁻⁹. To jeklo je med najbolj pogosto uporabljenimi materiali za te vrste orodij. Po svoji kemijski sestavi ustreza to jeklo za delo v vročem kvaliteti H11 po standardu ASTM, tj. jeklu X40CrMoV5-1 po standardu DIN oziroma jeklu Utop Mo1 po tovarniški oznaki slovenskega proizvajalca Metal, d.o.o., Ravne na Koroškem. Kemična sestava jekla je podana v **tabeli 1**.

Tabela 1: Kemična sestava jekla BOEHLER W300 ISODISC (v mas. %)^{7,8}

Table 1: Chemical composition of BOEHLER W300 ISODISC steel (in mas. %)^{7,8}

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38	1,1	0,4	5,0	1,3	0,4



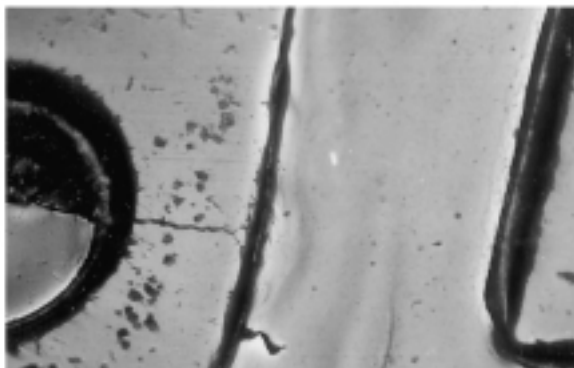
Toplotne in mehanske lastnosti jekla BOEHLER W300 ISODISC so dobro poznane in so opisane v strokovni literaturi⁷⁻⁹. Temperatura liquidusa zlitine AlSi9Cu3 je približno 593 °C¹⁰, zato so pri analizi obravnavanega problema pomembne lastnosti za temperaturni interval od 20 do 700 °C.

To jeklo ima pri temperaturi 20 °C gostoto približno 7800 kg/m³, ki se z naraščanjem temperature znižuje in se do temperature 700 °C zmanjša za približno 200 kg/m³. Posebno je zanimivo, da ima v temperaturnem območju od 20 do 700 °C relativno nizko in skoraj linearno naraščajočo toplotno prevodnost (19,2 do 26,3 W/mK) in sorazmerno konstantno temperaturno prevodnost (ves čas okoli 5·10⁻⁶ m²/s). Specifična toplota s temperaturo narašča in ima pri mejnih vrednostih izbranega temperaturnega intervala vrednosti približno 456 oziroma 587 J/kgK. Linearni reztznostni koeficient v odvisnosti od temperature počasi narašča od 10,7·10⁻⁶/K pri 20 °C do 13,2·10⁻⁶/K pri 700 °C, medtem ko modul elastičnosti s temperaturo pada in ima mejni vrednosti približno 211 in 168 GPa.

4 TERMOGRAFIJA

Na delovni površini zadnjega kalupa orodja (**slika 1**) smo med predgrevanjem orodja na njegovo začetno predpisano delovno temperaturo 240 °C, homogena po vsej delovni površini orodja, izvedli termografske meritve. Predpisana temperatura je nekaj nižja od opisanih vrednosti v strokovni literaturi, ki so v območju med 260 in 305 °C¹.

Za uporabo termografskih meritev smo se odločili predvsem zato, da preverimo, ali začetno temperaturno polje na aktivni površini zadnjega kalupa orodja doseže predpisano temperaturo in homogenost. Za preskusne



Slika 2: Aktivna delovna površina orodja. Odtisi jamic; SEM; pov. 200-krat (levo). Razpoke in jamičasta površina; pov. 100-krat (desno)
Figure 2: Active working surface of the die. Surface pits; SEM; magn. 200x (left). Surface cracks and pits; magn. 100x (right)

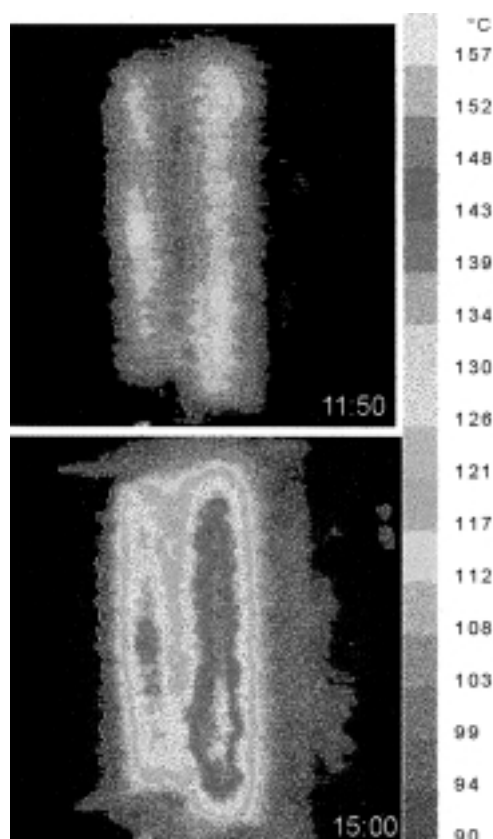
meritve pri izbranem orodju pa smo se odločili zato, ker je geometrija obravnavanega orodja relativno enostavna, kar je omogočilo relativno enostavno analizo toplotnih slik (termogramov).

V primerjavi z optičnimi pirometri, ki so omejeni na izbrano točko viziranja oziroma majhno površino, omogoča termografska kamera vpogled v temperaturno polje po celotni opazovani površini izbranega objekta¹¹. Znotraj vidnega polja približno 30° horizontalno in 20° vertikalno kamera oblikuje temperaturno sliko iz več desetisoč točk. Od oddaljenosti kamere od objekta pa je odvisna geometrijska ločljivost posameznih detajlov.

Kontrolne meritve temperatur na površini orodja in umerjanje termografske kamere smo opravili z atestiranim termometrom GULTON TastoTherm D1200. S termometrom smo najprej izmerili temperaturo 61,2 °C v izbrani in označeni točki na površini zadnjega kalupa orodja, nekaj sekund po tem smo termografsko kamero usmerili v isto točko in izmerili 67,1 °C. Razlika med izmerjenima temperaturama je posledica t. i. faktorja emisivnosti, ki ima v konkretnem primeru vrednost 0,91 (je v mejah iz strokovne literature poznanih vrednosti¹²), ki ga neumerjena termografska kamera sama avtomatsko ne upošteva in ga je treba pred vsako meritvijo posebej (eksperimentalno) določiti.

Porazdelitve temperature na aktivni delovni površini orodja so nazorno prikazane na barvnih termogramih. Te dobimo tako, da se črno-bele termograme obarva s 16 diskretnimi barvami, kjer vsaka barva ponazarja določen kvant sivine. Diskretni prehodi med barvami bolj očitno ponazarjajo razlike v temperaturi, geometrijske podrobnosti pa so manj jasne. Barvni termogrami so zaradi ocene velikosti temperature opremljeni z barvno skalo.

Na **sliki 3** je potek predgrevanja orodja dokumentiran s t. i. toplotnimi slikami - termogrami. Za vsak termogram je pomemben čas snemanja, torej ura in minuta (**tabela 2**) nastanka posnetka.



Slika 3: Predgrevanje - termograma

Figure 3: Preheating process - Thermographs

Termogram na **sliki 3** (zgoraj) je prikazan z razširjeno barvno skalo, da je lahko direktno primerljiv s spodnjim, ki je nastal kasneje, ko so bile nižje temperature na površini predgrevanega orodja. Neposredno je seveda mogoče primerjati le termograme obarvane, v istem temperaturnem območju. Termograma na **sliki 3** sta prikazana v območju temperatur od 90 do 161 °C, kjer so neobarvana področja (črna) pod 90 °C.

Tabela 2: Kronološki potek procesa predgrevanja - preskusni primer

Table 2: Chronological flow of preheating process - testing case

Čas / Time (ura:min)/(hour:min)	Operacija / Operation	Maksimalna temperatura na površini / Maximal surface temperature (°C)
10:50	pričetek predgrevanja / start of preheating	
11:30	začetek meritev / start of measurements	91
11:32	kalibriranje termografske kamere / calibrating of thermographic camera	
11:50	odprtje orodja / opening of the die	125
12:20	pretok olja za ogrevanje orodja povečan za 100% / increase of heating oil flow for 100%	
12:45	zagon ogrevanja orodja s povečanim pretokom olja / start of the heating by increased oil flow	
14:00	odprtje orodja / opening of the die	150
15:00	odprtje orodja / opening of the die konec meritev / end of measurements	161

Časi predgrevanja podobnih orodij so v praksi neprijemno krajši (največ do približno 2 uri), kot pri našem preskusu (približno 4,5 ure). Poleg tega smo med samim preskusom po približno uri in pol tudi povečali pretok ogrevalnega olja ($T \approx 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) s 30 l/min (kar se v praksi normalno uporablja) na 60 l/min (**tabela 2**). Glede na ta dva parametra je lahko v praksi pričakovano predgrevanje orodja kvečjemu slabše od predgrevanja pri preskusnih termografskih meritvah.

5 SKLEP

Termogram (toplotna slika) daje uporabne podatke tako za razvoj novih oziroma korekcijo starih (že izdelanih in uporabljenih) orodij kot tudi za preverjanje poteka tehnologije tlačnega litja. S termogramov na sliki 3 je za obravnavani primer jasno, da predpisane temperature ($240\text{ }^{\circ}\text{C}$) in homogenosti temperaturnega polja v obravnavanem primeru brez spremembe načina ogrevanja in posega v samo konstrukcijo orodja ni mogoče doseči.

Vemo, da je pri procesu tlačnega litja primarni vir obremenitve orodja ciklično spreminjanje temperature, druge sile pa so relativno majhne¹³. Zato bi bila v prvi fazi ena od rešitev problema sprememba lege ogrevalnih oziroma hladilnih kanalov, tj. njihova premaknitev bliže

delovni površini orodja, kar bi omogočilo višje in bolj homogeno pregetje aktivne delovne površine orodja.

6 LITERATURA

- ¹ S. Kalpakjian, Tool and Die Failures - Source Book, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 1982, 3
- ² V. J. Colongelo, F. A. Heiser, Analysis of Metallurgical Failures, John Wiley & Sons, Inc., New York 1974, 164
- ³ P. F. Timmins, Fracture Mechanisms and Failure Control for Inspectors and Engineers, ASM International, Materials Park, Ohio 1995, 111
- ⁴ Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Volume 1, ASM International, Metals Park, Ohio 1992, 410
- ⁵ F. Kosel, L. Kosec, Strojniški vestnik, 29 (1983) 7-9, 151
- ⁶ G. Lichtenegger, H. Schweiger, R. Breitler, H. Lenger, BHM, 143 (1998) 5, 169
- ⁷ Böhler Gmbh Praha: Oceli Böhler - Vyrobní Program, Praga, 1998
- ⁸ Böhler Edelstahlhandbuch auf PC V2.0, Kapfenberg, 1996
- ⁹ F. Richter, Physikalische Eigenschaften von Stählen und Ihre Temperaturabhängigkeit, Mannesmann Forschungsberichte 930/1983, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf 1983, 14
- ¹⁰ MatWeb - The Online Materials Property Data: <http://www.matweb.com/search/index.com>
- ¹¹ H. Haferkamp, W. F. Bach, M. Niemeyer, R. Viets, Aluminium, 75 (1999) 11, 945
- ¹² T. C. Lindon, Heat Transfer, Prentice Hall, New Jersey 1992, 107
- ¹³ S. Suresh, Cambridge Solid State Science Series: Fatigue of Materials, Cambridge University Press, Cambridge 1991, 67